东北黑土典型坡耕地土壤呼吸特征的研究

黄诚诚[(1)];王迎春[(1)];张渐飞[(2)];王立刚[(1)]

(1). 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部面源污染控制重点实验室/中国农业科学院-美国新罕布什尔大学可持续农业生态系统联合实验室 北京 100081; (2). 黑龙江省绥化市青冈县人民办事中心 青冈 151600

摘 要: 本研究以东北黑土典型坡耕地为研究对象，利用 LI-8100 土壤呼吸测量仪对玉米全生育期土壤呼吸进行了原位监测，分析了坡耕地不同部位(坡顶、坡肩、坡背、坡趾)、土壤呼吸速率变化规律、土壤呼吸总量、土壤呼吸速率与土壤水热因子之间的关系。结果表明：该地区土壤呼吸速率呈现“春秋季低夏季高”的季节性变化规律，坡趾位置土壤呼吸峰值显著高于坡顶、坡肩、坡背位置(P<0.05)。不同部位土壤呼吸速率与土壤温度呈现显著线性关系(P<0.05)，与土壤含水量相关性不显著(P>0.05)。土壤呼吸总量以坡趾位置最高[523.97 g(CO_2-C)·m^{-2}]，显著高于坡背[443.13 g(CO_2-C)·m^{-2}]、坡肩[426.81 g(CO_2-C)·m^{-2}]、坡顶[388.5 g(CO_2-C)·m^{-2}]3 个位置 18.5%、22.8%和 34.9%(P<0.05)。说明黑土坡耕地不同位置土壤呼吸存在显著差异，准确评价黑土坡耕地土壤呼吸需要综合考虑坡耕地不同坡位的差异，减少引用平地监测结果来评估坡耕地土壤呼吸量所造成的偏差。

关键词: 黑土; 坡耕地; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤湿度

中图分类号: S-3

Characteristics of soil respiration on typical cropland slope in mollisol region of Northeast China*

HUANG Chengcheng[1], WANG Yingchun[1], ZHANG Jianfei[2], WANG Ligang[1**]

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academic of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture / CAAS-UNH Joint Laboratory for Sustainable Agro-ecosystem Research, Beijing 100081, China; 2. Heilongjiang Province Qinggang County People’s Service Center, Qinggang 151600, China)

Abstract: The characteristics of soil respiration in cropland slopes are different from those in cropland plains. In order to accurately evaluate greenhouse gases emission in Northeast China farmland, it was necessary to study the patterns and factors influencing soil respiration in different cropland slopes. The study was conducted on a typical cropland slope in a mollisol region in Northeast China. An entire cropland slope was divided into four slope positions based on change in gradient — summit, shoulder-slope, back-slope and toe-slope. The LI-8100 probe was used to monitor soil respiration throughout the maize growing period. Water content and temperature of the surface soil (0–20 cm soil layer) were respectively measured using soil moisture meter and thermometer. The relationship between soil carbon dioxide (CO_2) flux and the impact of temperature, soil moisture content were then analyzed for different slop positions (summit, shoulder-slope, back-slope and toe-slope). The study laid the basis for scientific evaluation of soil respiration and carbon balance in mollisol in cropland slopes. The results showed that CO_2 flux in summer was higher than in spring and autumn. Peak soil respiration occurred during the period from maize silking to tasseling, which was from July 3 to August 23 in the study area. During this period, the cumulative respiration was 58.7%–59.9% of total soil respiration for the whole growing period of maize across the four slope positions, indication it was the main period of soil respiration in mollisol regions in Northeast China. The peak rate of soil respiration was significantly different in each slope position (P < 0.05). It was significantly higher in the toe-slope position [7.56 μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}] than at the summit [5.60 μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}], shoulder-slope [6.08 μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}] and back-slope [6.47 μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}]. The results showed that soil respiration rates among different slope positions in typical mollisol regions were significantly different, especially in summer. CO_2 flux had a positive, linear correlation with soil temperature for all the slope positions (P < 0.05). The exponential equation best expressed the relationship between soil temperature and soil respiration rate. Then temperature sensitivity (Q_{10}) was the strongest for the back-slope position, compared with the others. There was an insignificant correlation between soil respiration and soil volumetric water content. These results indicated that change in soil temperature significantly influenced soil respiration rate. The cumulative emission of CO_2 in toe-slope [523.97 g(CO_2-C)·m^{-2}] was 18.5%, 22.8% and 34.9% higher than in back-slope [443.13 g(CO_2-C)·m^{-2}], shoulder-slope [426.81 g(CO_2-C)·m^{-2}] and summit [388.50 g(CO_2-C)·m^{-2}], respectively. This was caused by the migration and redistribution of organic carbon, the change in soil bulk density, and the related effect on soil under the different environmental factors. The results of the study suggested that it was necessary to consider the respiration characteristics of different slope positions in order to limit any deviations in the monitoring

results in cropland plains in the scientific evaluation of soil respiration on cropland slopes.

Keywords: Mollisol; Cropland slope; Soil respiration; Soil temperature; Soil moisture content

土壤呼吸是陆地生态系统向大气释放 CO_2 的主要过程[1]。探知土壤呼吸及其影响因素对于调控大气 CO_2 浓度和气候动态的变化有着非常重要的意义。农田生态系统土壤呼吸与农田生态系统养分循环、区域碳循环及气候变化息息相关[2]。侵蚀作用下坡耕地土壤会发生迁移转运，具有从坡顶、坡肩位置流失到坡背、坡趾发生沉积的特征，土壤有机碳也会随着土壤流失发生迁移转运，致使坡耕地土壤呼吸具有与平地不同的特征[3]。当前对坡耕地土壤呼吸的研究具有截然不同的认知, Liu 等[4-5]通过田间监测和模型模拟指出，沉积区土壤新富集的有机碳中绝大部分会与其他矿物质结合形成新的微团聚体，并且在不断的沉积过程中被埋藏起来，从而弱化了土壤呼吸；但 Lal[6-7]的研究则表明沉积区有机碳的累积提高了土壤有机碳含量，同时这部分累积的有机碳也更易于被矿化分解，导致土壤呼吸量的增加。同时土壤呼吸还受地形[8-9]、水分、温度[10-12]、有机质[13]、氮素[13-14]、pH[15]等众多因素的影响，在多数情况下温度与湿度是影响土壤呼吸的关键环境因子[16-17]。坡耕地不同坡位土壤含水量、土壤温度也存在差异，通常含水率高的位置土壤温度变化具有明显滞后效应，而这种相对复杂的有机碳分布和水热条件也会影响土壤呼吸过程[14]。国内对坡耕地土壤呼吸的研究同样表明，在不同的水热条件以及有机碳的侵蚀-沉积特征下不同坡位土壤呼吸量的差异会发生变化[3,18]。Wei 等[19]指出黑土坡耕地沉积区土壤呼吸在不同降雨水平下，侵蚀区与沉积区土壤呼吸速率之间的差异性会发生变化。降雨结束后短时间内侵蚀区土壤呼吸速率要高于沉积区，但随着时间推移侵蚀区与沉积区之间的土壤呼吸速率差异会减小。

黑土是我们国家的“粮食稳压器”和生态安全的保障基地[20-21]，漫岗漫坡耕地是其典型地形特征，黑土区内水土流失面积达 27.67 万 km^2，占黑土区总土地面积的 27%[22]。以往的研究多关注于侵蚀方式及其特点[23]、泥沙流失量[24]以及侵蚀过程有机碳流失量[25]的研究，而对于坡耕地土壤呼吸特征及其影响因素研究则相对滞后[26]。因此，本研究以黑龙江省典型黑土坡耕地为例，通过野外监测，系统研究了玉米全生育期内不同坡位土壤呼吸规律，分析了土壤水热因子对坡耕地土壤呼吸的影响，以期为科学评判黑土坡耕地土壤呼吸及其碳平衡提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验地点

试验地点位于黑龙江省青冈县民政乡，46°43′N，126°10′E，属中温带大陆性季风气候，春季干旱多风，夏季温热多雨，秋季凉爽干燥，冬季严寒少雪，四季分明。年平均气温 2.4~2.6 ℃，最冷月平均气温–20.9 ℃，最热月平均气温 22.1 ℃。2016 年平均降水量 487 mm，主要集中在 7、8 月份，全年无霜期 130 d 左右。所选坡耕地自 1990 年开发成耕地区域以来连续耕作 26 年，种植作物为玉米。2016 年 5 月 2 日玉米播种，9 月 27 日玉米收获。施用肥料为氮肥(尿素)、磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)，化肥施用量与当地农民习惯施肥量一致，一次性基施氮肥(N)250 kg·hm^{-2}，磷肥(P_2O_5)135 kg·hm^{-2}，钾肥(K_2O)100 kg·hm^{-2}。在种植以及生育期内不进行人工灌溉。

试验地地形图以及各坡位分布如图 1 所示，其中坡耕地长 182.3 m，坡顶长 34.6 m，坡肩长 36.4 m，坡背长 50.0 m，坡趾长 61.3 m，各坡位宽度均为 7 m。供试土壤为黏壤质黑钙土，表层土壤有机碳量含量坡背、坡趾位置分别为 24.7 g·kg^{-1} 和 21.7 g·kg^{-1}，坡顶位置和坡肩位置为 20.1 g·kg^{-1} 和 18.5 g·kg^{-1}。坡顶、坡肩、坡背和坡趾位置土壤容重分别为 0.97 g·cm^{-3}、0.95 g·cm^{-3}、1.00 g·cm^{-3} 和 0.92 g·cm^{-3}(表 1)。整个坡耕地土壤的全氮、速效磷和速效钾的平均含量分别为 2.32 g·kg^{-1}、48.22 mg·kg^{-1} 和 194.45 mg·kg^{-1}。

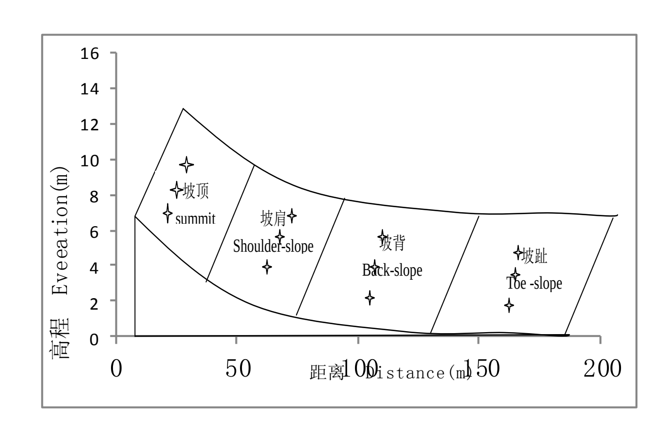


图 1　坡耕地各坡位地形图(✦为监测位点)

Fig. 1　Topographic map at different slope positions of the tested slope farmland(✦ shows sampling positions)

表 1　研究区坡耕地各坡位表层土壤有机碳、容重和坡度

Table 1　Soil organic carbon contents, bulk densities and gradients at different slope positions of the tested slope farmland

坡位 Slope position	有机碳 Organic carbon $(g \cdot kg^{-1})$	容重 Bulk density $(g \cdot cm^{-3})$	坡度 Gradient (°)
坡顶 Summit	18.5±0.5d	0.97±0.02ab	6
坡肩 Shoulder-slope	20.1±1.0c	0.95±0.03ab	3
坡背 Back-slope	24.7±0.2a	1.00±0.01a	2
坡趾 Toe-slope	21.7±0.3b	0.92±0.02b	1

1.2　监测方法

选择典型黑土坡耕地坡顶、坡肩、坡背、坡趾 4 个位置进行监测(图 1)，每个坡位选取 3 个不同的位置作为监测位点，各监测位点间隔 1 m 做为 3 次重复。监测期为 2016 年 5 月 11 日—2016 年 9 月 23 日玉米生长全生育期，具体检测日期为 5 月 11 日(苗期)、5 月 27 日(拔节期)、6 月 15 日(小喇叭口期)、7 月 3 日(大喇叭口期)、7 月 15 日(抽雄期)、7 月 27 日(吐丝期)、8 月 10 日(乳熟期)、8 月 23 日(蜡熟期)和 9 月 11 日(完熟期)，共测量 9 次。每次具体测量时间为上午 8:00—10:00。土壤呼吸测量所用仪器为 LI-8100 土壤碳通量自动测量系统(LI-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)，同时分别利用土壤水分测量仪(TRIME-PICO64)和温度计(JM624)测定土壤表层(0~20 cm)含水率与土壤温度。利用 LI-8100 可以直接读出实时的土壤呼吸速率，利用内插法计算相邻两次监测之间的未检测日期的累积呼吸量，然后将每天的交换通量累加即可得到整个生长季气体累积呼吸量。

1.3　数据分析

利用 SAS 9.0 进行各坡位之间土壤呼吸累积量和土壤呼吸速率的差异性分析、土壤呼吸速率与土壤含水率以及土壤温度之间的相关性分析，土壤呼吸速率与土壤温度之间的回归分析。利用 Microsoft Excel 2007 进行绘图。

2　结果与分析

2.1　坡耕地不同坡位土壤呼吸速率季节变化特征

在整个玉米生育期内，黑土坡耕地土壤呼吸速率具有明显的季节性变化规律，整体表现为“春秋季低，夏季高”，且各坡位变化趋势一致。均是在玉米生长前期 5—8 月之间处于一个上升的时期，排放高峰出现在 7 月下旬到 8 月上旬之间(图 2)。在玉米生育前期，各坡位土壤呼吸速率差异较小，随着玉米的生长各坡位土壤呼吸速率差异逐渐加大，而在玉米生育后期各坡位土壤呼吸速率差异又逐渐变小，这与 Van Oost 等[27]的研究结果基本相同。但各坡位土壤呼吸速率峰值却存在显著差异(P<0.05)，坡顶[5.60 μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}]、坡肩[6.08 μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}]值均低于坡背[6.47 μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}]和坡趾[7.56 μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}]值。表明在黑土坡耕地，同一区域不同坡位土壤呼吸速率存在差异，尤其是在夏季土壤呼吸高峰期差异更加明显。

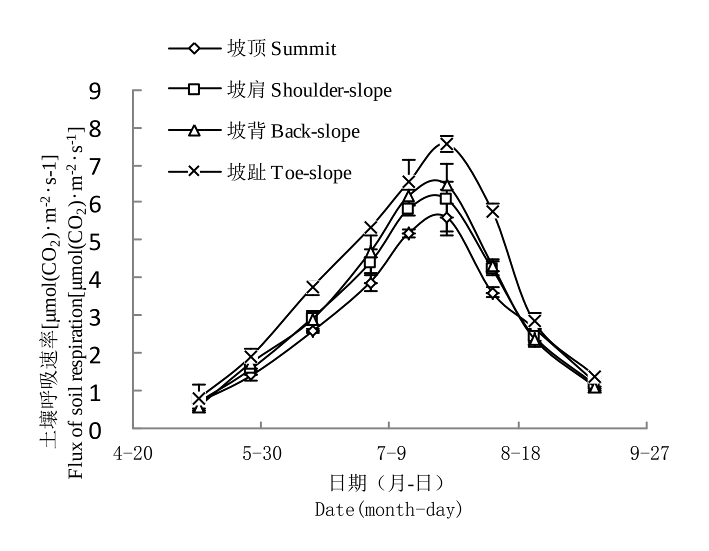


图 2　研究区坡耕地各坡位土壤呼吸速率变化

Fig. 2　Dynamics of soil respiration rates at different slope positions of the tested slope farmland

2.2　坡耕地不同坡位土壤累积呼吸量

不同坡位土壤累积呼吸量也差异显著，以坡趾为最高，达 523.97 g(CO_2-C)·m^{-2}，分别比坡背[443.13 g(CO_2-C)·m^{-2}]、坡肩[426.81 g(CO_2-C)·m^{-2}]、坡顶[388.50 g(CO_2-C)·m^{-2}]显著高 18.5%、22.8%和 34.9%(P<0.05)，坡背、坡肩位置分别比坡顶位置土壤累积呼吸量显著高 13.9%和 9.9%(P<0.05)(图 3)。表明黑土坡耕地坡趾、坡背等沉积区位置土壤累积呼吸量要显著高于侵蚀区(P<0.05)。这与李嵘等[3]的研究结果一致。

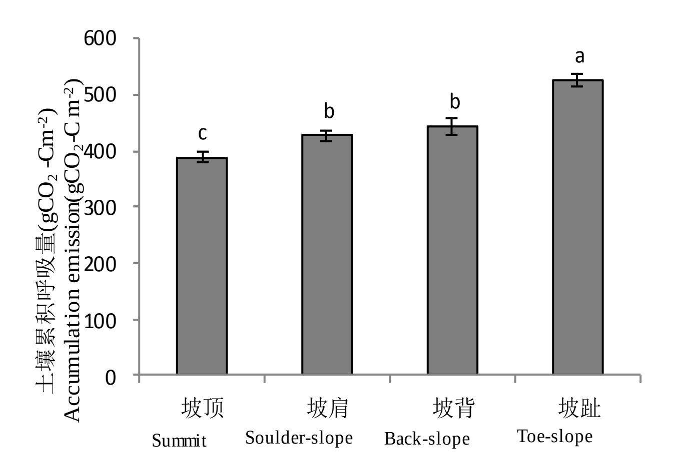


图 3　研究区坡耕地各坡位玉米生育期表层土壤累积呼吸量

Fig. 3　Accumulation of surface soil respiration during the growth stage of corn at different slope positions of the tested slope farmland

2.3　坡耕地土壤呼吸速率与土壤含水率和温度的关系

东北地区温度是影响土壤呼吸速率的主要环境因子，温度高会促进土壤微生物活性与植物根呼吸作用从而影响土壤呼吸作用[28]。玉米整个生育期内坡耕地不同坡位土壤呼吸速率均与土壤温度之间呈显著的正相关关系(P<0.05)，本研究中坡顶位置土壤呼吸速率与土壤温度的相关性最强，达 0.81，坡背位置相关性最低，为 0.72(表 2)。这与其他研究者在平地上的研究结果一致[29]。而在整个玉米生育期中，土壤体积含水率与土壤呼吸速率的相关性不显著(P>0.05)。

利用回归分析表明，指数函数(R_s=ae^{bT})[2]能较好地拟合不同坡位土壤呼吸速率(R_s)与土壤温度(T)之间的关系(表 3)。4 个坡位土壤呼吸速率对土壤温度的敏感性均较强(Q_{10}=e^{10b})，为 3.9~4.9，其中坡背位置土壤呼吸速率对土壤温度的敏感性最强，坡顶位置相对于其他 3 个位置敏感性较小。

表 2　坡耕地不同坡位土壤呼吸通量与土壤温度和土壤含水率的相关性(n=27)

Table 2　Correlations between soil respiration rate and soil temperature, water content at different slope positions of the tested slope farmland (n=27)

坡位 Slope position	温度 Temperature	体积含水率 Water content
坡顶 Summit	0.81*	0.39ns
坡肩 Shoulder-slope	0.80*	–0.12ns
坡背 Back-slope	0.72*	0.12ns
坡趾 Toe-slope	0.76*	–0.37ns

表示显著相关(P<0.05), ns 表示相关性不显著。 means significant correlation at 0.05 level. ns means no significant correlation.

表 3　坡耕地不同坡位土壤呼吸速率(R_s)与土壤温度(T)拟合方程和温度敏感性(Q_{10})

Table 3　Fitting equations between soil respiration rate (R_s) and soil temperature (T) and temperature　sensitivity (Q_{10}) of soil at different slope positions of the tested slope farmland

坡位 Slope position	拟合方程 Fitted equation		
	指数方程 Exponential equation	R^2	Q_{10}
坡顶 Summit	$R_s=0.185e^{0.137T}$	0.932	3.9
坡肩 Shoulder-slope	$R_s=0.198e^{0.139T}$	0.856	4.0
坡背 Back-slope	$R_s=0.131e^{0.159T}$	0.913	4.9
坡趾 Toe-slope	$R_s=0.131e^{0.159T}$	0.896	4.2

3　讨论

在玉米全生育期内，坡耕地土壤呼吸速率具有“春秋季低夏季高”的明显季节性变化，其中坡顶、坡肩、坡背、坡趾 7 月 3 日—8 月 23 日的累积呼吸量分别占其整个生育期土壤呼吸总量的 58.7%~59.9%，说明东北黑土区坡耕地玉米抽雄期和吐丝期是坡耕地土壤呼吸的主要时期，这与多数研究者在平地的研究结果基本一致[30]。但本研究结果表明坡耕地不同坡位(坡顶、坡肩、坡背、坡趾)土壤呼吸速率具有明显差别，且沉积区(坡背、坡趾)土壤呼吸速率显著高于侵蚀区(坡顶、坡肩)。当前研究结果表明侵蚀作用会改变侵蚀区(坡顶、坡肩)土壤理化性质，提高土壤温度，减少土壤水分，增加土壤呼吸速率[31]。但是在沉积区土壤有机碳具有互相抵消的累积效应和埋藏效应，导致沉积区土壤呼吸速率变化存在“增加”或“降低”的不确定性[26]，这可能与土壤类型、侵蚀导致的侵蚀区和沉积区的土壤性状及环境因子有关[32]。

对于土壤呼吸总量而言，乔云发等[30]研究了与本试验点位置同属一个积温带的黑龙江省海伦地区的平地，春玉米全生育期土壤呼吸总量为 410.0　g(CO_2-C)·m^{-2}(有机碳含量为 28.0　g·kg^{-1})，与本研究结果相比较，坡顶位置比这一值低 5.2%，而坡肩、坡背、坡趾位置分别比这一值高 4.1%、7.9%、27.8%。说明在评估坡耕地与平地土壤呼吸时，需要将平地与坡耕地区别对待，简单地用平地土壤呼吸数据评估坡耕地土壤呼吸则有可能“高估”[7-8]或“低估”[5-6]其土壤呼吸量。而在本试验条件下，以面积比例加权平均各坡位的土壤呼吸量，从而估计出整个坡耕地的土壤呼吸量为 456.4 g(CO_2)·m^{-2}($V_{土壤呼吸}=V_{坡顶}\times19\%+V_{坡肩}\times20\%+V_{坡背}\times27.4\%+V_{坡趾}\times33.6\%$)，这比直接将 4 个坡位的土壤呼吸量平均得出的结果[445.6 g(CO_2)·m^{-2}]高 2.4%，因此直接平均计算有可能会低估坡耕地的土壤呼吸量。本研究结果中，坡趾位置土壤呼吸总量比坡顶位置显著(P<0.05)高 34.9%，这是由多种原因导致，主要包括有机碳的迁移-再分布、土壤容重的变化，以及土壤水热因子的差异等[3]。坡趾位置有明显的有机碳沉积，含量比坡顶位置高 17.3%，这会对土壤呼吸强度有明显的调控作用，Franzluebbers 等[33]的研究结果显示土壤基础呼吸与土壤有机碳含量呈线性相关关系，但对于坡耕地而言，有机碳含量并不是唯一的调控因子，例如，在坡背有机碳的累积量最多，但累积呼吸量却低于坡趾位置，这可能是有机碳的沉积会在一定程度上形成保护埋藏作用[5]，同时不同坡位温度、含水率等环境因子的差异也会对土壤呼吸造成影响[4,34]。本研究还只是 1 年的监测结果，针对黑土坡耕地不同坡位土壤呼吸之间的差异以及确定其主要影响因子，还需要进一步连续的观测与研究。

对于坡耕地土壤呼吸速率与土壤温湿度的相关性分析表明，与湿度相比坡耕地呼吸速率在整个玉米生育期内受土壤温度的调控更为显著(P<0.05)，说明坡耕地土壤温度的变化对土壤呼吸速率具有显著的影响，这与其他研究者在平地的研究结果一致[34]。土壤湿度与土壤呼吸速率的相关性并不显著(P>0.05)，但是对 2016 年 5 月 11 日至 27 日玉米苗期坡耕地土壤呼吸速率与土壤温湿度的相关关系研究结果则显示，这段时间内土壤呼吸速率与土壤含水率呈现显著相关性，坡顶、坡肩、坡背、坡趾相关系数分别为 0.71、0.79、0.61、0.53(P<0.05)。因此本研究结果并不能说明土壤呼吸速率与土壤湿度无关，可能是在整个监测期内土壤温度的变化幅度更大而土壤湿度一直在 20%~30%这样一个适宜土壤呼吸的范围内波动，因此可能掩盖了土壤湿度变化对土壤呼吸速率的影响作用[2]。说明在不同时期、不同气候条件下，坡耕地土壤呼吸的主要调控因子可能会发生变化[8]，需要在以后加深这方面的研究。

4　结论

坡耕地各坡位的土壤呼吸速率在玉米全生育期内的变化具有明显的“春秋季低夏季高”季节性变化规律，土壤呼吸速率峰值出现在玉米抽雄—吐丝期，不同坡位(坡顶、坡肩、坡背、坡趾)土壤呼吸峰值差异显著(P<0.05)，沉积区(坡背与坡趾)高于侵蚀区(坡顶与坡肩)。

玉米全生育期内坡耕地各坡位土壤呼吸总量存在显著差异。坡趾的土壤呼吸总量比坡背和坡肩显著高 18.5%和 22.8%(P<0.05)，坡背和坡肩分别比坡顶显著高 13.9%和 9.9%(P<0.05)。

坡耕地不同坡位土壤呼吸速率与土壤温度之间呈显著正相关性关系(P<0.05)，指数方程能较好地拟合土壤温度与土壤呼吸速率之间的关系，坡背位置的温度敏感性(Q_{10})最强，坡顶位置受温度变化的影响相对较小；在整个玉米生育期内土壤湿度与土壤呼吸速率的相关性并不显著，但在不同生育期相关性会有所不同。

参考文献 References

[1] Schimel D, Stephens B B, Fisher J B. Effect of increasing CO_2 on the terrestrial carbon cycle[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(2): 436–441

[2] 骆亦其，周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 姜丽芬，曲来夜，周玉梅，等译. 北京：高等教育出版社, 2007: 63–133
Luo Y Q, Zhou X H. Soil Respiration and the Environment[M]. Jiang L F, Qu L Y, Zhou Y M, et al, Trans. Beijing: Higher Education Press, 2007: 63–133

[3] 李嵘，李勇，李俊杰，等. 黄土丘陵侵蚀坡地土壤呼吸初步研究[J]. 中国农业气象, 2008, 29(2): 123–126
Li R, Li Y, Li J J, et al. A preliminary study on soil respiration of eroded sloping land in Chinese Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(2): 123–126

[4] Liu S G, Bliss N, Sundquist E, et al. Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1074

[5] VandenBygaart A J, Kroetsch D, Gregorich E G, et al. Soil C erosion and burial in cropland[J]. Global Change Biology, 2012, 18(4): 1441–1452

[6] Lal R. Soil erosion and carbon dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 81(2): 137–142

[7] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. Environment International, 2003, 29(4): 437–450

[8] 魏守才. 水土流失对黑土坡耕地土壤有机碳的影响[D]. 长春：中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2015: 3–17
Wei S C. Effect of soil erosion on soil organic carbon on sloping field of black soil area in northeast China[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2015: 3–17

[9] 李志刚，侯扶江. 管理方式与地形对黄土高原丘陵沟壑区草地土壤呼吸的影响[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 721–724
Li Z G, Hou F J. Effects of management and topography on soil respiration of grassland in gullied-hilly area of the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4): 721–724

[10] 杨玲，廖允成，高茂盛，等. 不同耕作措施下旱作麦田 CO_2 排放速率与土壤水热关系分析[J]. 西北农业学报, 2011, 20(1): 70–75
Yang L, Liao Y C, Gao M S, et al. Relationship analysis of CO_2 emission fluxes and soil temperature and moisture in rainfed wheat field with different tillage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(1): 70–75

[11] 梁贻仓，李佩茹. 农田土壤呼吸研究进展[J]. 中国人口 资源与环境, 2014, 24(S2): 279–281
Liang Y C, Li P R. Research advances of soil respiration in farmland[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(S2): 279–281

[12] 张宇，张海林，陈继康，等. 耕作措施对华北农田 CO_2 排放影响及水热关系分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 47–53
Zhang Y, Zhang H L, Chen J K, et al. Effects of different tillage practices on CO_2 emission fluxes from farmland in North China Plain and the analysis of soil temperature and moisture[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 47–53

[13] 刘爽，严昌荣，何文清，等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 2919–2924
Liu S, Yan C R, He W Q, et al. Soil respiration and it's affected factors under different tillage systems in dryland production systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11): 2919–2924

[14] 王立刚，邱建军，李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J]. 土壤肥料, 2002, (6): 13–17
Wang L G, Qiu J J, Li W J. Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer-corn in Huanghuaihai region in China[J]. Soils and Fertilizers, 2002, (6): 13–17

[15] Bååth E, Arnebrant K. Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(8): 995–1001

[16] Jiang G F, Liu C, Li J Q, et al. Soil respiration and driving factors of farmland ecosystems in China[J]. Scientia Sinica Vitae, 2014, 44(7): 725–735

[17] Hamdi S, Moyano F, Sall S, et al. Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 58: 115–126

[18] 陈盖，许明祥，张亚锋，等. 黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3383–3392
Chen G, Xu M X, Zhang Y F, et al. Characteristics of soil respiration along eroded sloping land with different SOC background

on the hilly loess plateau[J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3383–3392

[19] Wei S C, Zhang X P, McLaughlin N B, et al. Effect of soil temperature and soil moisture on CO_2 flux from eroded landscape positions on black soil in northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144: 119–125

[20] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全[J]. 中国水土保持, 2009, (1): 17–19

Liu X T, Yan B X. Soil and water loss and grain security of black soil region in Northeast[J]. Soil and Water Conservation in China, 2009, (1): 17–19

[21] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11): 2113–2125

Kang R F, Ren Y, Wu H J, et al. Changes in the nutrients and fertility of black soil over 26 years in northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11): 2113–2125

[22] Xu X Z, Xu Y, Chen S C, et al. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China: A retrospective study[J]. Environmental Science & Policy, 2010, 13(8): 793–800

[23] 高燕. 黑土区不同侵蚀方式对土壤团聚体和泥沙颗粒流失的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014: 1–7

Gao Y. Impacts of soil erosion on soil aggregates and particles losses in the black soil region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014: 1–7

[24] 吴限, 魏永霞, 王敏, 等. 不同农田植被条件下黑土坡耕地产流和产沙特征[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 101–104

Wu X, Wei Y X, Wang M, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in sloping farmland of black soil region under different farmland vegetation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(3): 101–104

[25] 方海燕, 盛美玲, 孙莉英, 等. ^{137}Cs 和 $^{210}Pb_{ex}$ 示踪黑土区坡耕地土壤侵蚀对有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1856–1862

Fang H Y, Sheng M L, Sun L Y, et al. Using ^{137}Cs and $^{210}Pb_{ex}$ to trace the impact of soil erosion on soil organic carbon at a slope farmland in the black soil region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1856–1862

[26] 魏守才, 张晓平, 陈学文. 土壤水蚀对土壤有机碳动态及全球碳循环平衡的影响[J]. 土壤与作物, 2015, 4(4): 156–162

Wei S C, Zhang X P, Chen X W. Effects of water-driven erosion on soil organic carbon dynamics and global carbon balance[J]. Soil and Crop, 2015, 4(4): 156–162

[27] Van Oost k, Quine T A, Gover G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. Science, 318(5850): 626–629

[28] 宋秋来, 赵泽松, 龚振平, 等. 东北黑土区旱作农田土壤 CO_2 排放规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 200–207

Song Q L, Zhao Z S, Gong Z P, et al. CO_2 emission law of dry farmland soil in black soil region of Northeast China[J]. Transactions of CSAE, 2012, 28(23): 200–207

[29] 来雪慧, 李丹, 于波峰, 等. 东北农场农作物生长季土壤呼吸对温度和含水量的响应[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 117–122

Lai X H, Li D, Yu B F, et al. Effects of soil temperature and water content on soil respiration rate during the crop growing season in a farm of northern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 117–122

[30] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 等. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1028–1035

Qiao Y F, Miao S J, Wang S Q, et al. Soil respiration affected by fertilization in black soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 1028–1035

[31] Bajracharya R M, Lal R, Kimble J M. Diurnal and seasonal CO_2-C flux from soil as related to erosion phases in central Ohio[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 286–293

[32] 崔利论, 袁文平, 张海成. 土壤侵蚀对陆地生态系统碳源汇的影响[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(6): 816–822

Cui L L, Yuan W P, Zhang H C. Soil erosion effect on terrestrial ecosystem carbon source and sink[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2016, 52(6): 816–822

[33] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, et al. Climatic influences on active fractions of soil organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(7/8): 1103–1111

[34] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217–227